



RESSORTFORSCHUNGSBERICHTE ZUR
SICHERHEIT DER NUKLEAREN ENTSORGUNG

Zentrale Untersuchung und Auswertung von Herstellungsfehlern und Betriebsschäden im Hinblick auf druck- führende Anlagenteile von Kernkraftwerken – Los 2

Arbeitspaket 2 – Auswirkungen von Mehrfacherdbeben auf die
Integrität von Rohrleitungssystemen in Kernkraftwerken

Vorhaben 4713R01352

AUFTRAGNEHMER:IN
Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart, Stuttgart

Fabian Dwenger
Dr. Klaus Kerkhof



Zentrale Untersuchung und Auswertung von Herstellungsfehlern und Betriebsschäden im Hinblick auf druckführende Anlagenteile von Kernkraftwerken – Los 2

Arbeitspaket 2 – Auswirkungen von Mehrfacherebeben auf die Integrität von Rohrleitungssystemen in Kernkraftwerken

Dieser Band enthält einen Ergebnisbericht eines vom Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung im Rahmen der Ressortforschung des BMU (ReFoPlan) in Auftrag gegebenen Untersuchungsvorhabens. Verantwortlich für den Inhalt sind allein die Autor:innen. Das BASE übernimmt keine Gewähr für die Richtigkeit, die Genauigkeit und Vollständigkeit der Angaben sowie die Beachtung privater Rechte Dritter. Der Auftraggeber behält sich alle Rechte vor. Insbesondere darf dieser Bericht nur mit seiner Zustimmung ganz oder teilweise vervielfältigt werden.

Der Bericht gibt die Auffassung und Meinung der Auftragnehmer:innen wieder und muss nicht mit der des BASE übereinstimmen.

BASE-RESFOR-019/21

Bitte beziehen Sie sich beim Zitieren dieses Dokumentes immer auf folgende URN:
urn:nbn:de:0221-2021110329482

Berlin, November 2021

Impressum

**Bundesamt
für die Sicherheit
der nuklearen Entsorgung
(BASE)**

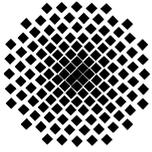
RESSORTFORSCHUNGSBERICHTE ZUR
SICHERHEIT DER NUKLEAREN ENTSORGUNG

Auftragnehmer:in
Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart, Stuttgart

Fabian Dwenger
Dr. Klaus Kerkhof

030 184321-0
www.base.bund.de

Erscheinungsdatum: November 2021



BMU-Vorhaben 3613R01352

**Zentrale Untersuchung und Auswertung von
Herstellungsfehlern und Betriebsschäden im Hinblick auf
druckführende Anlagenteile von Kernkraftwerken**

Arbeitspaket 2 (AP2)

**Auswirkungen von Mehrfacherdbeben auf die Integrität von
Rohrleitungssystemen in Kernkraftwerken**

Technischer Bericht AP2

MPA-Auftrags-Nr. 845 3000 002

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Umwelt, Naturschutz,
Bau und Reaktorsicherheit

März 2015

Materialprüfungsanstalt (MPA) Universität Stuttgart

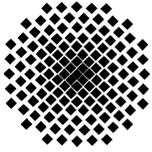
Anmerkungen:

Dieser Bericht ist von der Materialprüfungsanstalt (MPA) Universität Stuttgart im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) im Rahmen des Vorhabens 3613R01352 erstellt worden.

Die Auftraggeberin behält sich alle Rechte vor. Insbesondere darf dieser Bericht nur mit Zustimmung der Auftraggeberin zitiert, ganz oder teilweise vervielfältigt bzw. Dritten zugänglich gemacht werden.

Dieser Bericht gibt die Meinung und Auffassung der Auftragnehmerin wieder und muss nicht mit der Meinung der Auftraggeberin übereinstimmen.

Die MPA Universität Stuttgart und die Autoren übernehmen keine Haftung für Schäden, die aufgrund von weiterführenden oder fehlerhaften Anwendungen der in diesem Bericht dargestellten Ergebnisse entstehen.



BMU-Vorhaben 3613R01352

**Zentrale Untersuchung und Auswertung von Herstellungsfehlern
und Betriebsschäden im Hinblick auf druckführende Anlagenteile
von Kernkraftwerken**

Arbeitspaket 2 (AP2)

Auswirkungen von Mehrfacherdbeben auf die Integrität von Rohrleitungssystemen in
Kernkraftwerken

Technischer Bericht AP2

MPA-Auftrags-Nr. 845 3000 002

Verfasser: Dipl.-Ing. Fabian Dwenger
Dr.-Ing. Klaus Kerkhof

Projektleiter: Dipl.-Ing. Xaver Schuler

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Umwelt, Naturschutz,
Bau und Reaktorsicherheit

Stuttgart, März 2015

BMU-Vorhaben 3613R01352

Technischer Bericht AP2

K u r z f a s s u n g

Problemstellung und Zielsetzung

Durch Erdbeben mit starken Nachbeben (im folgenden Mehrfacherdbeben) können sich Ermüdungsschädigung und Effekte einer fortschreitenden Deformation (Ratcheting) in ungünstiger Weise überlagern. Dies kann zu einer relativ raschen Rissbildung mit anschließendem Risswachstum bis hin zu Wanddurchriss (Leckage) oder zum Bruch (vollständiger Abriss) der Rohrleitung führen. Hierzu ist die Aufarbeitung des aktuellen nationalen und internationalen Kenntnisstandes bezüglich der Auswirkung von Erdbebenlasten (Literaturlauswertung, Erfahrungsaustausch mit anderen Forschungsstellen, Teilnahme an fachspezifischen Konferenzen) erforderlich.

Ergebnisse

Bei modalanalytischen linearen Erdbebensicherheitsnachweisen nach der Antwortspektrenmethode führt die entkoppelte Betrachtungsweise von Gebäude und Komponente in der Regel zu Konservativitäten. Diese Konservativitäten führen offensichtlich dazu, dass über Schäden an Rohrleitungen nach Starkbeben kaum berichtet wird.

Resonanzanregung ist die Voraussetzung für große Schwingungsamplituden. Steifigkeiten von Rohrleitungshalterungen können oft aber nur mit Schwierigkeiten, vereinfachten Ansätzen oder mit Hilfe von Richtlinien abgeschätzt werden. Die Genauigkeit des Spannungsnachweises hängt wesentlich davon ab, wie präzise die tatsächlichen Halterungssteifigkeiten idealisiert werden. Es besteht eine nicht geringe Wahrscheinlichkeit, dass berechnete Eigenfrequenzen von den real auftretenden und experimentell bestimmten Eigenfrequenzen abweichen. Demzufolge kann die Vorhersage der Systemantwort unrealistisch sein. Deswegen kann es zu Über- und Unterschätzungen beim Spannungsnachweis für den Lastfall Erdbeben kommen, je nachdem ob der Fre-

quency Shift zwischen den Eigenfrequenzen der Rechnung und den vorhandenen Frequenzen sich in das Plateau eines Etagenantwortspektrum hinein- oder hinaus verschiebt. Beispiele hierzu sind bekannt.

Zu den denkbaren Schadensmechanismen gibt es Hinweise aus Forschungsvorhaben, dass andere Mechanismen als erwartet auftreten. Versagen trat meist erst nach extremer Laststeigerung und weitaus höherer Zyklenzahl als bei Starkbeben auf.

Weitere experimentelle Forschungsarbeiten zeigen ebenfalls auf, dass ein wahrscheinlicher Versagensmechanismus Ermüdung und Ratcheting ist, hierzu wurde im Rahmen eines internationalen Projekts ein Benchmarking gestartet.

Auch lokale Wanddickenreduzierung könnte zum Versagen einer Rohrleitung im Lastfall Erdbeben führen. Ein Versuch zeigte allerdings Ratcheting und schließlich Leckvor-Bruch Verhalten erst nach einer sehr hohen Zyklenzahl von Biegewechselbeanspruchungen selbst bei großflächigem und weit fortgeschrittenem Wanddickenabtrag. Welche Wechselwirkungen zwischen Rohrleitungen und mit Dübeln befestigte Halterungen beim Lastfall Erdbeben vorliegen können, wird derzeit untersucht.

BMU Project 3613R01352

Technical Report AP2

S u m m a r y

Problem and General Aim

By earthquakes with strong aftershocks (hereinafter multiple earthquakes) fatigue damage and effects of progressive deformation (ratcheting) can superimpose unfavorably. This can lead to a relatively rapid cracking and subsequent crack growth up to through wall crack (leakage) or failure (complete rupture) of the pipe. For this purpose, the national and international state-of-the-art related to effects of earthquake loads shall be summarized (literature review, experiences of other research institutions, participate in specialized conferences).

Results

The linear modal analytical procedure for earthquake safety assessment based on the spectra method produces the decoupled approach of building and component leads generally to conservatism. This may be the reason, that reporting about failures in piping induced by strong earthquakes is rather rare.

Resonance excitation is essential for large vibration amplitudes. The stiffness of pipe supports can be estimated in most cases only with difficulties, simplified approaches or with the help of guidelines. The accuracy of the determination of the stresses depends largely on how precisely the support stiffnesses are idealized. It is likely that calculated frequencies differ considerably from natural frequencies determined experimentally. For systems which show such frequency shifts, the predictions of stress analysis may be unrealistic. Overestimations and underestimations of stress analyses may be present, depending on whether the frequency shift runs into or out of the plateau of the applied floor response spectrum. Examples for unrealistically pre-calculated eigenfrequencies compared with measurement results are known.

There hints from research projects for possible damage mechanisms, that other mechanisms occur as expected. Failure occurred mostly after extreme load increase and much higher number of cycles than in strong aftershocks.

Further experimental research also show that the failure mechanism fatigue and ratcheting are more likely. For that benchmarking was launched as part of an international project.

Even local wall thickness reduction (wall thinning) could lead to failure of a pipe under earthquake loading. An experiment shows that ratcheting and finally leak-before-break behavior only after a very high number of cycles of bending stresses occurred even for large and advanced reduction in wall thickness.

Inhalt

	Seite
Zusammenfassung	11
1 Einleitende Bemerkung.....	13
2 Zielsetzung	14
3 Derzeitiger Stand beim Erdbebennachweis	14
4 Auslegung und Auslegungsüberschreitung	17
5 Auswirkungen auf die Funktionstüchtigkeit	19
6 Ermüdung und Ratcheting	20
7 Forschung mit Bezug zu Tragreserven von Rohrleitungen bei Erdbeben.....	23
7.1 HDR Sicherheitsprogramm	24
7.2 Projekt KARISMA.....	28
7.3 Projekt SMART2013	28
8 Bewertung	29
9 Literatur und Unterlagen	31

Zusammenfassung

Gemäß kerntechnischem Regelwerk ist nachzuweisen, dass die druckführenden Wandungen der Komponenten und Bauteile von Leichtwasserreaktoren im Rahmen der Auslegung allen spezifizierten Belastungen, also mechanische und thermische sowie korrosive, und im Rahmen des Alterungsmanagements allen real auftretenden Belastungen mit den gemessenen Häufigkeit in zulässiger Weise standhalten. Eine Bewertung erfolgt im Rahmen der Spannungsanalyse für statische Beanspruchungen und im Rahmen der Ermüdungsanalyse für den Fall einer schwingenden Beanspruchung. Bei der Überlagerung von Belastungen der Komponenten ist bei der Beanspruchungsstufe D das für die Auslegung gegen seismische Einwirkungen maßgebende Bemessungserdbeben mit zu berücksichtigen. Dabei können unter Bemessungserdbeben auch mehrere maßgebliche Beben oder die für die Auslegung maßgeblichen Bodenbewegungen am Standort der Anlage verstanden werden. Im Rahmen der Auslegungsanforderungen ist für die Erdbebensicherheit der Komponenten nachzuweisen, dass die jeweilige sicherheitstechnische Aufgabe im Falle eines Erdbebens erfüllt wird.

Durch Erdbeben mit starken Nachbeben (im folgenden Mehrfacherdbeben) können sich Ermüdungsschädigung und Effekte einer fortschreitenden Deformation (Ratcheting) in ungünstiger Weise überlagern. Dies kann zu einer relativ raschen Rissbildung mit anschließendem Risswachstum bis hin zu Wanddurchriss (Leckage) oder zum Bruch (vollständiger Abriss) der Rohrleitung führen. Hierzu wurde der aktuelle nationale und internationale Kenntnisstand bezüglich der Auswirkung von Erdbebenlasten anhand einer Literaturlauswertung, durch Erfahrungsaustausch mit anderen Forschungsstellen und durch die Teilnahme an fachspezifischen Konferenzen recherchiert und zusammenfassend dargestellt.

Bei modalanalytischen linearen Erdbebensicherheitsnachweisen nach der Antwortspektrenmethode führt die entkoppelte Betrachtungsweise von Gebäude und Komponente in der Regel zu Konservativitäten. Diese Konservativitäten führen offensichtlich dazu, dass kaum Schäden an Rohrleitungen nach Starkbeben festgestellt werden oder darüber berichtet wird.

Zu den denkbaren Schadensmechanismen gibt es Hinweise aus Forschungsvorhaben, dass andere Mechanismen als erwartet auftreten. Versagen trat meist erst nach extremer Laststeigerung und weitaus höherer Zyklenzahl als bei Starkbeben auf.

Weitere experimentelle Forschungsarbeiten zeigen ebenfalls auf, dass ein wahrscheinlicher Versagensmechanismus Ermüdung und Ratcheting ist. Hierzu wurde ein Benchmarking gestartet.

Rohrleitungen erfahren insbesondere nur dann große Erdbebenanregung, wenn Resonanz eintritt und ihre niedrigsten Eigenfrequenzen im hohen Plateau eines Etagenantwortspektrums liegen. Wenn Halterungssteifigkeiten oder Randbedingungen nicht bekannt sind, kann man

Näherungswerte verwenden, die in Abhängigkeit von der Nennweite angegeben werden und grobe Näherungen darstellen. Diese Näherungswerte werden häufig in Auslegungsrechnungen angesetzt. Lassen sich die unteren Eigenfrequenzen eines Rohrleitungssystems nicht sehr präzise ermitteln und liegen sie im ansteigenden bzw. abfallenden Ast zum Plateau, kann die Rechnung den Lastfall Erdbeben sowohl konservativ überschätzen als auch nicht-konservativ unterschätzen. Beispiele dafür, dass die vorliegenden Eigenfrequenzen der Auslegungsrechnung von den experimentell ermittelten abweichen können, sind u.a. aus dem HDR-Sicherheitsprogramm bekannt.

Auch lokale Wanddickenreduzierung, z. B. infolge Erosions-Korrosion, könnte zum Versagen einer Rohrleitung im Lastfall Erdbeben führen. Ein Versuch unter realistischen Randbedingungen zeigte allerdings Ratcheting und schließlich Leck-vor-Bruch Verhalten erst nach einer sehr hohen Zyklenzahl von Biegewechselbeanspruchungen selbst bei großflächigem und weit fortgeschrittenem Wanddickenabtrag.

1 Einleitende Bemerkung

Gemäß kerntechnischem Regelwerk, [1] und [2], ist nachzuweisen, dass die druckführenden Wandungen der Komponenten und Bauteile von Leichtwasserreaktoren (LWR) im Rahmen der Auslegung allen spezifizierten Belastungen (Belastungshöhe und Häufigkeit), also mechanische und thermische sowie korrosive, und im Rahmen des Alterungsmanagements [3] allen real auftretenden Belastungen mit den gemessenen Häufigkeit in zulässiger Weise standhalten. Eine Bewertung erfolgt im Rahmen der Spannungsanalyse für statische Beanspruchungen und im Rahmen der Ermüdungsanalyse für den Fall einer schwingenden Beanspruchung. Falls erforderlich sind für postulierte Fehler noch bruchmechanische Bewertungen durchzuführen. Die Auswirkungen der Ursachen für im Betrieb mögliche Schädigungsmechanismen sind dabei zu berücksichtigen. Für die unterschiedlichen Beanspruchungsstufen sind dann die Vergleichsspannungen σ_V und die Vergleichsspannungsschwingbreiten $\Delta\sigma_V$ in Abhängigkeit der mechanischen Eigenschaften des Werkstoffs zu begrenzen. Gemäß dem anzuwendenden KTA-Regelwerk sind bei der Ermittlung der Beanspruchungen infolge der statischen und dynamischen Belastungen für die unterschiedlichen Komponenten und Rohrleitungsteile Spannungserhöhungsfaktoren zu verwenden.

Bei der Überlagerung von Belastungen der Komponenten ist bei der Beanspruchungsstufe D das für die Auslegung gegen seismische Einwirkungen maßgebende Bemessungserdbeben mit zu berücksichtigen [4], Tabelle 1. Dabei können unter Bemessungserdbeben auch mehrere maßgebliche Beben oder die für die Auslegung maßgeblichen Bodenbewegungen am Standort der Anlage verstanden werden. Im Rahmen der Auslegungsanforderungen ist für die Erdbebensicherheit der Komponenten (Tragfähigkeit, Integrität, Funktionsfähigkeit) nachzuweisen, dass die jeweiligen sicherheitstechnische Aufgabe im Falle eines Erdbebens erfüllt wird.

Durch Erdbeben mit starken Nachbeben (im Folgenden als Mehrfacherdbeben bezeichnet) können sich Ermüdungsschädigung und Effekte einer fortschreitenden Deformation (Ratcheting) in ungünstiger Weise überlagern. Dies kann zu einer relativ raschen Rissbildung mit anschließendem Risswachstum bis hin zu Wanddurchriss (Leckage) oder zum Bruch (vollständiger Abriss), z.B. einer Rohrleitung, führen.

Ergeben sich neue Erkenntnisse in Bezug auf die der Auslegung zugrunde gelegte Nachweisführung zur Erdbebensicherheit sind diese zu überprüfen und ggf. zu überarbeiten [5].

Tabelle 1 :Beispiel für die Überlagerung von Belastungen der Komponenten und Zuordnung zu Beanspruchungsstufen gemäß [1]

Beanspruchungsstufen	Belastungen ¹⁾												
	Statische Belastung						Transiente Belastungen			Schwingende und dynamische Belastungen			
	Auslegungsdruck	Auslegungstemperatur ²⁾	Druck	Temperatur ²⁾	Eigen-gewicht und andere Lasten	Mecha-nische Lasten, Reak-tions-kräfte	Behin-derte Wär-medeh-nung	Transiente Lasten (Druck, Temperatur, mechanische Lasten), dyna-mische Bela-stung	Anomale Belastungen (sta-tisch und dyna-misch)	Prüfbelastungen (statisch und dyna-misch)	Be-mes-sungs-erdbe-ben	Einwir-kungen von innen	Sonsti-ge Ein-wirkun-gen von außen
Stufe 0	X	X			X								
Stufe A			X	X	X	X	X	X					
Stufe B			X	X	X	X	X		X				
Stufe P			X	X	X					X			
Stufe C			X	X	X	X							
			X	X	X	X						X	
Stufe D			X	X	X	X					X		
			X	X	X	X						X	
			X	X	X	X							X

¹⁾ Im jeweiligen Belastungsfall ist zu prüfen, welche Belastungen zutreffen.
²⁾ Zur Festlegung des Spannungsvergleichswertes bei der für die betreffenden Belastungen maßgebenden Temperatur.

2 Zielsetzung

Zielsetzung der vorliegenden Arbeiten ist es, den Kenntnisstand bezüglich der Auswirkung von Erdbebenlasten, insbesondere beim Auftreten von Mehrfacherebeben, auf die Werkstoffschädigung (Ermüdungsverhalten in Kombination mit fortschreitender Deformation) und das Versagensverhalten (Leckage, Bruch) von Rohrleitungskomponenten zusammenzustellen und zu bewerten.

Hierzu war der aktuelle nationale und internationale Kenntnisstandes bezüglich der Auswirkung von Erdbebenlasten (Literaturauswertung, Erfahrungsaustausch mit anderen Forschungsstellen, Teilnahme an fachspezifischen Konferenzen) zu recherchieren und zusammenfassend darzustellen.

3 Derzeitiger Stand beim Erdbebennachweis

Bei integren Komponenten erfolgt die sicherheitstechnische Bewertung von Komponenten gemäß den geltenden Regelwerken fast ausschließlich über spannungsbasierte Kriterien (Absicherung der unterschiedlichen Spannungskategorien, Konzept der Spannungsabsicherung). Das bedeutet, dass die im Bauteil auftretenden integralen und lokalen Beanspruchungen (Spannungen) die zum Versagen des Bauteils führenden Grenzwerte nicht erreichen oder übersteigen. Plastische Dehnungen werden hier nur zu einem geringen Maß zugelassen. Die in der Kerntechnik verwendeten ferritischen und austenitischen Stähle verfügen jedoch über

ein sehr hohes Plastifizierungsvermögen. Für zulässige Dehnungen sind derzeit im kerntechnischen Regelwerk keine Grenzwerte zur Dehnungsabsicherung enthalten. Insbesondere für postulierte Lastfälle mit geringer Eintrittswahrscheinlichkeit (Störfälle wie Erdbeben) sowie auslegungsüberschreitende Belastungen werden dabei die Verformungsreserven zäher metallischer Werkstoffe nicht oder nur ungenügend ausgenutzt.

Die Grundsätze für die Auslegung von Anlagenteilen (maschinentechnische Einrichtungen, wie z.: Behälter, Rohrleitungen, Pumpen und Armaturen) und baulichen Anlagen gegen seismische Einwirkungen (Erdbeben) sind für deutsche Kernkraftwerke in der KTA-Regel 2201.1 [4] enthalten. Die Anforderungen an die Auslegung von Anlagenteile sind in KTA 2201.4 [6] festgelegt. Die Übertragungskette und Idealisierung bei der Nachweisführung ist in Bild 1 dargestellt, eine Übersicht über die Nachweisführung in Bild 2. Der erste Schritt, die seismische Gefährdungsanalyse, führt zu den standortspezifischen ingenieurseismologischen Kenngrößen (Bodenantwortspektrum, Zeitdauer der Erregung sowie ggf. registrierte Zeitverläufe der Bodenbeschleunigung) des für die Auslegung maßgebenden Bemessungserdbebens. Ausgehend von den ingenieurseismologischen Kenngrößen kann das Bauwerk unter Berücksichtigung der Boden-Bauwerk-Wechselwirkung berechnet und ausgelegt. Hieran schließt sich die Bewertung der Anlagenteile an. Diese Bearbeitungssequenz entspricht auch der Übertragungskette des Erdbebens: Die Antwort des vorangehenden (Haupt-) Systems „Gebäude“ stellt die Einwirkung für das folgende (Unter-) System, z. B. Anlagenteil Rohrleitung dar. Zumeist wird dabei die Rückwirkung des Untersystems auf das Hauptsystem vernachlässigt, d. h. die Systeme werden zwangsweise entkoppelt. Dies führt in der Regel zu Konservativitäten, deren Größe von den Massenverhältnissen und vom Verhältnis der maßgebenden Eigenfrequenzen von Haupt- und Untersystem abhängt.

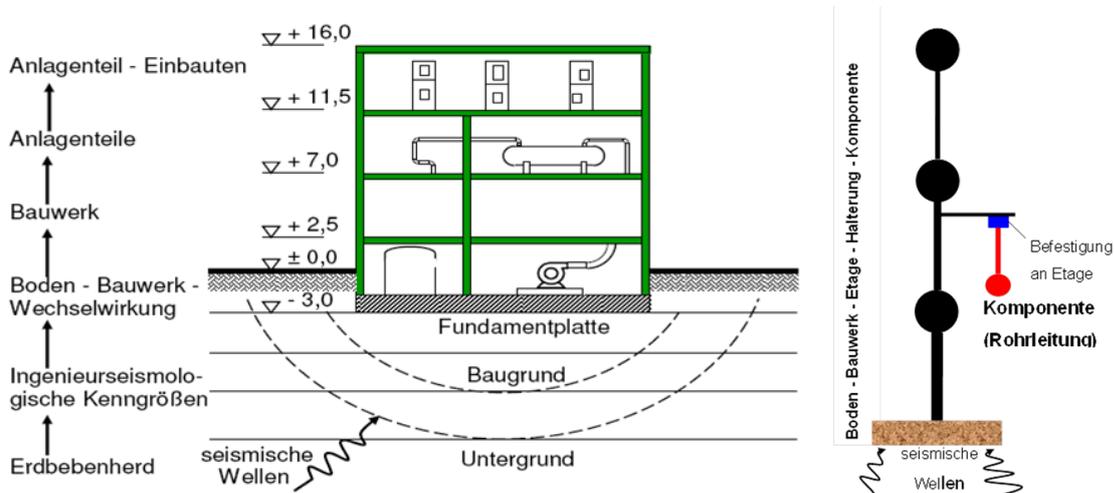


Bild 1: Übertragungskette und Idealisierung für den Erdbebennachweis

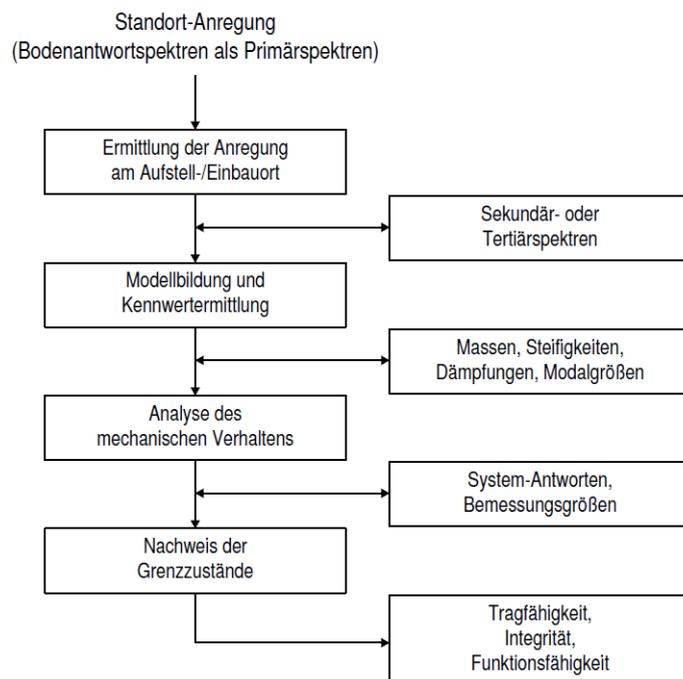


Bild 2: Übersicht über die Nachweisführung gemäß [6]

Im Rahmen der Nachweisführung sind die Anlagenteile in drei Klassen zu unterteilen [4]:

- Klasse I:
Anlagenteile, die zum Erreichen der Schutzziele (Kontrolle der Reaktivität, Kühlung der Brennelemente, Einschluss der radioaktiven Stoffe und Begrenzung der Strahlenexposition) erforderlich sind.
- Klasse IIa:
Anlagenteile, die nicht zur Klasse I gehören, die aber durch die bei einem Erdbeben an ihnen möglicherweise entstehenden Schäden und deren Folgewirkungen Anlagenteil der Klasse I in ihrer sicherheitstechnischen Funktion beeinträchtigen können.
- Klasse IIb:
Alle sonstigen Anlagenteile.

Der wichtigste Praxisbezug liegt in der Schnittstelle Anlagentechnik – Bautechnik: Halterungsbedingungen und Lagerungsbedingungen (Anschlüsse zu anderen System, Durchführungen, usw.) können hinsichtlich ihrer Steifigkeitskennwerte oftmals nur überschlägig bestimmt werden. Dementsprechend können die für den Erdbebennachweis erforderlichen Eigenfrequen-

zen ebenfalls nur näherungsweise ermittelt werden. Durch Veränderung von Lagerungsbedingungen ändert sich das Modalverhalten und es können Frequenzverschiebungen (Frequency Shifts) gegenüber der Auslegungsrechnung auftreten, die es zu bewerten gilt.

Aufgrund der hohen Risiken, die mit dem Ausfall einzelner Anlagenteile verbunden sind, werden derzeit Arbeiten durchgeführt, die das Verhalten von Befestigungen und Anlagenteile unter seismischer Belastung untersuchen und die Wechselwirkung zwischen Verankerung und Rohrleitung betrachten, [7] und [8]. Es wird davon ausgegangen, dass im Fall von Stark- oder Mehrfacherebeben die beschriebenen Wechselwirkungen einen großen Einfluss auf die Systemantwort der Rohrleitung haben.

Die Komponenten betreffend findet man vor allem Literatur zu elektrischen Anlagen wie Schaltschränken. Diese werden u.a. durch Rütteltischversuche qualifiziert, bei denen mehrfach hintereinander erdbebenähnliche Belastungen simuliert werden. Am Ende dieser Erdbebensimulationen folgt in der Regel noch ein Sinus-Sweep oder eine Sineburst-Belastung, um Tragreserven auszuloten.

Zur Thematik Erdbeben mit starken Nachbeben findet man in der Literatur im Wesentlichen Beschreibungen aus seismologischer Sicht. Darin wird vor allem die Integrität von Gebäuden behandelt, die mehrere Nachbeben nach einem Hauptbeben erfahren haben. Über Untersuchungen zur gesamten Übertragungskette vom Boden über das Gebäude, die Etage bis hin zur Komponente „Rohrleitung“ liegen keine verwertbaren Unterlagen vor.

4 Auslegung und Auslegungsüberschreitung

Beim Erdbebensicherheitsnachweis werden international meist zwei Kategorien von Erdbeben zugrunde gelegt: Das sogenannte „Sicherheitserdbeben“ (SSE, Safe Shutdown Earthquake), und das sogenannte „Betriebserdbeben“ (OBE, Operating Basis Earthquake). Das SSE entspricht jenem Erdbeben, dessen Eintrittshäufigkeit an einem gegebenen Standort im Bereich von einmal in 10.000 Jahren liegt. Für das OBE wird gemäß der Praxis in den USA die Hälfte der Stärke des SSE angenommen. Die mittlere Wiederkehrperiode für das OBE liegt aufgrund der bisherigen internationalen Erfahrungen bei 200 bis 400 Jahren.

Die sicherheitsrelevanten Anlagenteile – wie das Reaktorgebäude oder die Notstandssysteme – sind für das seltenere SSE ausgelegt.

Wenn - wie beispielsweise nach dem im Schweizer ENSI-Regelwerk - Sicherheitsnachweise für den Lastfall OBE-„Betriebserdbeben“ zu führen sind, bedeutet das, dass Gebäude und die Anlagenteile den Lastfall OBE mehrfach ohne Integritätsverlust ertragen müssen. OBE stellt somit einen Erdbebenlastfall dar, dessen Auftreten als „mehrfach“ zu postulieren ist. Nicht für

deutsche Kernkraftwerke, aber in den USA und anderen europäischen Ländern sind Nachweise für den Lastfall OBE zu führen.

Um im Falle eines Erdbebens entlang der gesamten Übertragungskette Boden-Bauwerk – Etage - Anlagenteil (Rohrleitung) quantifizieren zu können, welches Erregungsniveau (OBE oder SSE) vorliegt bzw. vorlag, werden kerntechnische Anlagen seismisch instrumentiert: Im Schweizerischen Regelwerk ENSI wird z.B. zwischen OBE und SSE differenziert. In den „Mindestanforderungen an die seismische Instrumentierung in schweizerischen Kernkraftwerken“ [9], sind auch Rohrleitungen, wie z.B. der Primärkreislauf, zu instrumentieren. Damit wird die Auswirkung auf „OBE“- Mehrfacherdbeben zumindest punktuell dokumentiert und quantifiziert, Bild 3 und Tabelle 2.

Tabelle 2 : Beispiel für Anforderungen der seismischen Instrumentierung (Tab. 1 aus [9])

Informationsort Standort	Informationsart				
	Kennzeichnung	Triaxiale Zeitbeschleunigung	Triaxiales Veraltensspektrum	Triaxiale Maximalbeschleunigung	Seismischer Anzeiger
1 Freifeld	F1	(1)**			
2 Reaktorgebäude					
2.1 Fundamentplatte	G1	1*	1*		1*
2.2 Zwischenboden	G2		1		
2.3 RDB-Abstützung oder Primärkreisabstützung	G3	1			
2.4 RDB	G4			1	
2.5 Primärkreislauf	G5			1	
3 Angebautes Nebengebäude EKI Systeme und Komponenten					
3.1 Komponentenabstützung oder Rohrleitungsabstützung	K1		1		
3.2 Komponente oder Rohrleitung	K2			1	
4 Freistehendes Nebengebäude (mit unterschiedl. Schwingungsverhalten zum Reaktorgebäude)					
4.1 Gebäudefundamentplatte	U1		1		
5 evtl. zusätzliche Instrumente für krit. Bauteile oder Komponenten	(K3)				
TOTAL Standorte	9				
TOTAL Informationen		3 (2)	4	3	1

* Kommandoraumfernmeldung

** Kann weggelassen werden, sofern Boden-Gebäudeinteraktion vernachlässigt ist

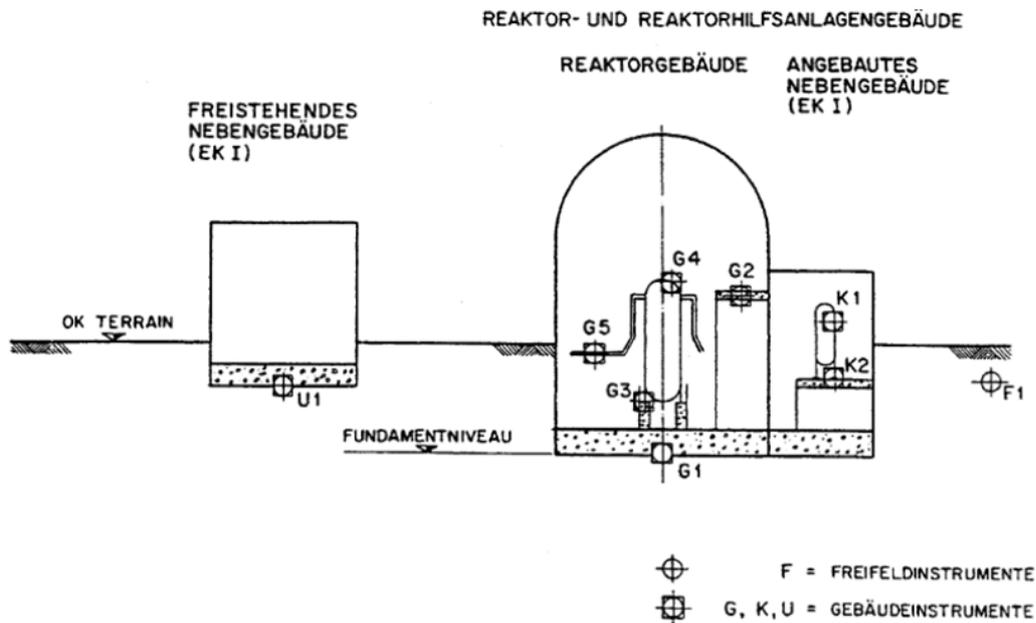


Bild 3: Beispiel für Anforderungen an die seismische Instrumentierung (Fig. 1 aus [9])

5 Auswirkungen auf die Funktionstüchtigkeit

In [10] wurden die Schäden an Komponenten und Rohrleitungen von 24 Kernkraftwerken infolge der sechs größten Erdbeben in Japan untersucht und in einer Datenbank gespeichert. Es zeigte sich aufgrund umfangreicher Untersuchungen und Tests, dass für Anlagenteile der höchsten seismischen Klasse S genügend Tragreserven vorlagen. Für Anlagenteile der darunter liegenden seismischen Klassen B und C lagen dagegen keine quantitativen Aussagen vor. In 29 Fällen wurde Funktionsverlust oder ein Ausfall registriert. Werden alle untersuchte Komponenten und Rohrleitungen betrachtet, so waren die Schadenshäufigkeiten bei allen Untersuchungen klein. Die meisten Rohrleitungsschäden traten außerhalb von Gebäuden und bei erdverlegten Rohrleitungen auf. Eine Kleinleitung (Wasserabscheider) brach im Gebäude auf der ersten Etage, Tabelle 3.

Infolge des "Miyagi offshore earthquake" am 16.08.2005 wurde aufgrund zu hoher Fundamenthorizontalbeschleunigungen eine Schnellabschaltung aller drei Reaktoren des Kernkraftwerks Onagawa ausgelöst. Während der Nachuntersuchung wurden speziell in Reaktor 1 (älter als 20 Jahre) an Rohrleitungskomponenten Ultraschallprüfungen, Wanddickenmessungen, Sichtprüfungen und Impulshammerversuche durchgeführt. Bei den Prüfungen wurden keine Schäden festgestellt [11].

Im Bericht [12] wird zum Kernkraftwerk Onagawa berichtet, dass trotz langer Starkbebendauer und partieller Überschreitung der Auslegungsgrenzen sämtliche Komponenten ihre vorgesehene Funktionsfähigkeit ohne signifikante Schädigung behielten. In bestimmten Frequenzbereichen trat eine signifikante Überschreitung der Auslegungsspektren auf, Bild 4.

Reaktor 1: Infolge des Stromausfalls wurde das RCIC-System mit den Notstromdieselmotoren betrieben. Alle Systeme funktionierten auslegungsgemäß ohne feststellbare Schäden. Es gab keine bedeutenden Leckagen in den Rohrleitungssystemen.

Reaktor 3: Das RCIC- und RHR-System arbeiteten auslegungsgemäß ohne Kühlmittelverlust in den Rohrleitungssystemen.

Der einzige Fall eines Rohrleitungsversagens trat bei Reaktor 1 bei einer erdverlegten Feuerlöschleitung auf. Der Schaden wird auf signifikante Baugrundverschiebungen zurückgeführt. Bis zum Zeitpunkt der Veröffentlichung des Berichts wurde jedoch noch keine Druckprüfung der Rohrleitungssysteme durchgeführt.

Tabelle 3 : Orte mit Schadensfällen oder Funktionsverlust (Tabelle 8 aus [10])

		Boundary function				Support function			
		Components		Piping		Components		Piping	
		Class B	Class C	Class B	Class C	Class B	Class C	Class B	Class C
Indoor	Reactor Building	0	0	0	0	0	0	0	0
	Turbine Building	0	0	1	0	4	0	0	0
	Others	0	0	0	0	0	0	0	0
Outdoor	On Bedrock	0	0	0	0	0	0	0	0
	Not on Bedrock (on the ground)	0	4	0	4	0	10	0	0
	Not on Bedrock (underground)	0	0	0	6	0	0	0	0
Total		4		11		14		0	

6 Ermüdung und Ratcheting

In einer Umfrage der OECD/CSNI/WIAGE (Working Group on Integrity and Ageing of Components and Structures) wurde im Rahmen des MECOS Projekts (Metallic Component Margins under High Seismic Loads) ein Überblick (survey by means of a questionnaire) über existierende seismische Regularien und Analysemethoden im Bereich der Mitgliedsstaaten (Beteiligung von deutscher Seite durch die GRS Köln) geschaffen werden. Dabei handelt es sich in der ersten Phase des MECOS-Projekts im Wesentlichen um die Beantwortung von 24 Fragen für die Bereiche „Seismic Input“, „Seismic Design Basis“ und „Beyond Seismic Design Basis“ [13]. Für den Bereich „Seismic Input“ liegt der Bericht [14] vor, Tabelle 4 zeigt den Vergleich der Vorgehensweise in den einzelnen Mitgliedsstaaten.

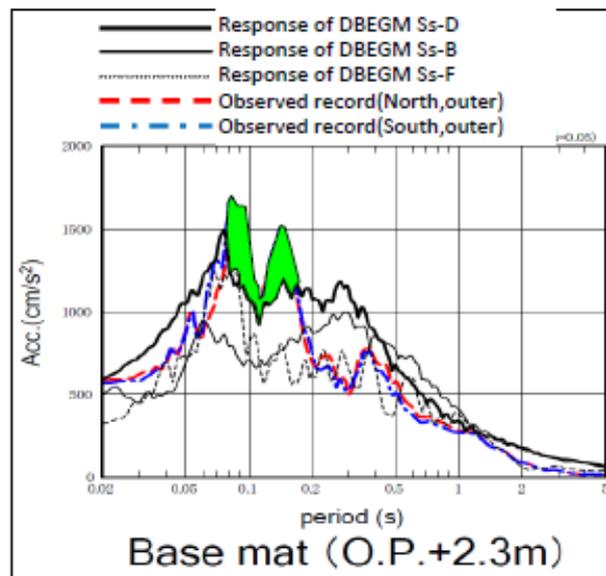


Figure 5-10 Exceedance of Acceleration Floor Response Spectra in R/B Unit 1 due to 3.11 EQ in direction EW – Exceedance in the ranges 6 to 13 Hz. For example, 1.37-times exceedance (1230 cm/s² vs. 1690 cm/s²) at 12.5 Hz and 1.25-times exceedance (1155 cm/s² vs. 1450 cm/s²) at 6.7 Hz.

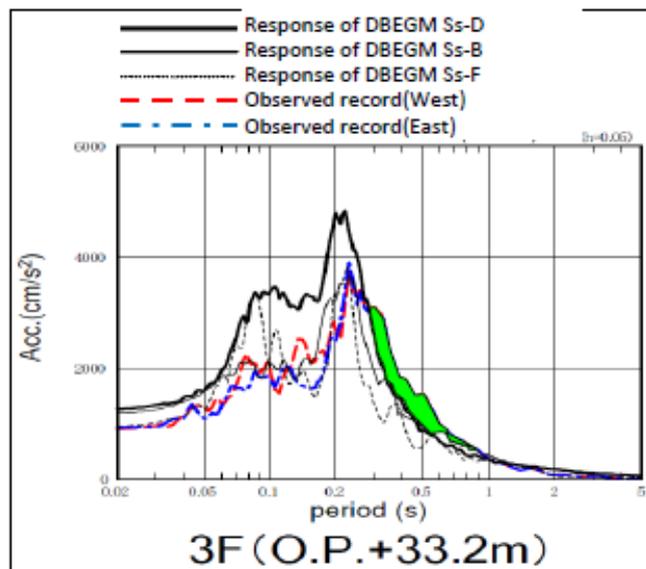


Figure 5-11 Exceedance of Acceleration Floor Response Spectra in R/B Unit 2 due to 3.11 EQ in direction NS – Exceedance in the ranges 1.1 to 3.5 Hz. For example, 1.63-times exceedance (950 cm/s² vs. 1550 cm/s²) at 2.0 Hz and 1.20-times exceedance (2575 cm/s² vs. 3100 cm/s²) at 3.3 Hz

Bild 4: Überschreitung des Etagenantwortspektrums der Auslegung auf Ebene 2,3 m im Frequenzbereich 6 bis 13 Hz (oben) und Überschreitung des Etagenantwortspektrums der Auslegung auf Ebene 33,2 m im Frequenzbereich 1,1 bis 3,5 Hz (unten) [12]

Aspekte zu Ermüdung und Ratcheting für die Bereiche „Seismic Design Basis“ und „Beyond Seismic Design Basis“. werden direkt durch die Fragen Q12, Q13, Q21 und Q22 behandelt und sind zusammenfassend nachfolgend dargestellt [13].

Tabelle 4 Vergleich „Seismic Input“ gemäß [14]

	Does it have national specific standards for definition of seismic input for nuclear sites?	Is SHA expected to be deterministic, or probabilistic? (target probabilities)	Does it recognise the need to account for local response?	Is there specific guidance for the local site response calculation?
Canada	Yes	Probabilistic (10^{-4})	Yes	No
Czech Republic	No, probably SSG-9 to be adopted	--	--	--
Finland	Yes	Probabilistic (10^{-5})	Yes, although it prefers founding directly on bedrock.	No
France	Yes	Deterministic	Yes	No, but gives two different spectral shapes depending on soil conditions.
Germany	Yes	Both (10^{-5})	Not explicitly, but defines input on "free field"	No
Japan	Yes	Deterministic	Yes	No, but gives several spectral shapes depending on soil conditions.
Slovenia	No, follows US regulation.	--	--	--
South Korea	Yes	Both ($< 10^{-5}$)	Yes	No
Spain	No, follows US regulation.	--	--	--
Sweden	No regulations, but a technical research document serves as guidance, safety guide in draft	Probabilistic (10^{-5})	Yes (technical document)	Yes
The Netherlands	IAEA guides officially adopted, plus unofficial guidelines.	Probabilistic (10^{-4} and 10^{-6})	Yes (as per IAEA guidelines)	No
United Kingdom	No (only general principles)	Probabilistic (10^{-4})	Yes.	No
United States	Yes	Both (10^{-4} and 10^{-5})	Yes	Yes

Q12:

Do you consider seismic induced fatigue in seismic design? If so, how?

- Seismic fatigue is not required to be evaluated by Finland, Sweden and UK.
- Germany and Czech Republic perform conditional fatigue evaluations or post seismic inspections.
- Maximum fatigue cycles vary from 5 to 25.

Q13:

Do your national code acceptance criteria allow for plasticity in seismic design?

- Majority of respondent's national codes do not allow plasticity in seismic design.
- Limited plasticity is allowed by Germany, Sweden, France and Japan.

Q21:

Do you have requirements/ expectations for seismically designed components to be able to withstand beyond design basis earthquake (BDBE)?

- BDBE requirements/expectations are specified for Canada, Finland, UK, France, Japan.
- BDBE assessments applied after Fukushima (Stress Test).
- SMA/SPRA is required by some respondents.

Q22:

What kind of margins do you require/expect in the design of SSCs important to safety to withstand beyond design basis earthquake?

- Majority of respondents do not require any margin above DBE/SSE.
- The margins ranged from 1.5 to 1.67 for Belgium and Canada respectively.
- For NPPs in Japan, evaluated margins ranged from 1.3 to 2.
- In the German nuclear regulations and safety standards there are no requirements for beyond design basis earthquakes (i. e. earthquakes exceeding the loads of the design basis earthquake, [1] bis [4] und [6]).

Darüber hinaus wird im MECOS Projekt ein Benchmark durchgeführt, um Tragreserven von Rohrleitungen im Hinblick auf geltende Auslegungspraktiken für hohe Erdbebenbelastung zu quantifizieren. Dabei handelt es sich in Phase 1 um blinde Vergleichsrechnungen zu indischen Versuchen des Bhabha Atomic Research Centers (BARC), bei denen der Versagensmechanismus Fatigue-Ratcheting vorlag. Diese Aufgabenstellung steht vor dem Hintergrund, dass das beobachtete Fatigue-Ratcheting möglicherweise anstelle einer nach der gängigen Auslegungskriterien anzunehmenden plastischen Instabilität eintritt, wie in den vorläufige Schlussfolgerung [13] dargestellt.

In den USA gilt bis zum Erscheinen neuer Richtlinien die SECY-93-087 Policy, Fatigue Staff Requirement Memorandum (SRM) [15]. Darin wird seismisch induzierte Ermüdung mit Erdbeben-Spannungszyklen in Verbindung gebracht. Berücksichtigt werden müssen zwei SSE – Erdbeben mit 10 maximalen Spannungszyklen für jedes Erdbeben. Es wird angenommen, dass diese Belastungsfolge gleichzusetzen ist mit der zyklischen Belastung von einem SSE und fünf OBE Erdbeben.

7 Forschung mit Bezug zu Tragreserven von Rohrleitungen bei Erdbeben

Nachfolgend wird auf Forschungsvorhaben zur Thematik Tragreserven von Rohrleitungen beim Lastfall Erdbeben hingewiesen und diese kurz umrissen. Dabei handelt es sich meist um experimentelle Erdbebensimulation mit Laststeigerungen (Mehrfache Erdbebenbelastung und Resonanzanregungen) bis zum Versagen der Rohrleitung auf Rütteltischen oder Shakeranregung bzw. servohydraulische Systemanregungen.

7.1 HDR Sicherheitsprogramm

Ein umfangreiches Forschungsprojekt zur Integrität von Reaktorgebäude und Komponenten – vor allem Rohrleitungen – bei Störfallbelastungen stellte das Heißdampfreaktor (HDR-) Sicherheitsprogramm dar. Hier wurden Rohrleitungen mit und ohne postulierten Fehlern hintereinander folgend mehrfach erdbebenähnlich beansprucht, [16], [17] und [18].

In der letzten Versuchsserie von Phase II des HDR-Sicherheitsprogramms, den sogenannten SHAM-Versuchen (Servohydraulische Anregung von mechanischen Komponenten) wurde eine ungeschädigte Rohrleitung untersucht, bei der verschiedene Halterungskonzepte getestet wurden. Die Anregungslast wurde schrittweise um Faktoren eines SSE erhöht. Ziel war die Ermittlung von Sicherheitsreserven, bis Halterungsversagen bzw. hohe bleibende Verformungen in der Rohrleitung auftreten.

Die Versuchsserie von Phase II wurde in Phase III des HDR-Sicherheitsprogramms fortgesetzt mit einem Rohrleitungssystem, das mit Rissen behaftet ist. Als Anfangsrisslängen wurden Risslängen unterhalb der Detektionsgrenze von zerstörungsfreien Prüfverfahren erzeugt, Tabelle 5.

Die E32-Versuchsgruppe war in zwei Versuchsreihen unterteilt. In der ersten waren der Umfangsriß im geraden Rohrabschnitt, in der zweiten das Längsrisselfeld im Rohrbogen Gegenstand der Untersuchung. Beide geschädigte Komponenten wurden allerdings gleichzeitig in das Versuchskreislauf (VKL) - Rohrleitungssystem eingebaut. Durch die bei den zwei Versuchsreihen gewählten unterschiedlichen Unterstützungskonzepte des VKL-Systems sowie die diametrale Lage der Untersuchungskomponenten war der geschädigte Krümmer während der ersten Versuchsreihe quasi nicht beansprucht. Die Reihenfolge der Versuche sind in Tabelle 5 und Tabelle 6 dargestellt, der Versuchskreislauf einschließlich der Anregungsposition ist in Bild 4 gezeigt.

Die erste Versuchsreihe hatte zum Ziel, das mit einem Umfangsriß behaftete gerade Rohrleitungsstück durch „Erdbeben“- Belastung bis zum Versagen zu bringen. Nach der ersten „Erdbeben“ – Etappe wurde der Riss mittels Sineburst-Anregung auf eine neue Risstiefe vorangetrieben. Die dritte Etappe wurde analog der ersten durchgeführt. Erst bei der sechsfachen SSE - Belastung wurde eine geringe Risstiefenzunahme festgestellt. Als Fazit ließ sich feststellen, dass Fehlergrößen, wie sie zu Beginn jeder „Erdbeben“ – Etappe vorlagen, auch bei Beanspruchungen im Bereich der Zulässigkeitsgrenze nach der KTA-Regel 3201.2 [1] für Störfälle der Stufe D für integrale Bauteile zu keinem Versagen führten. Erst bei der achten Wiederholung einer sechsfachen SSE-Beanspruchung kam es zu einem Versagen in Form eines Lecks. In metallografischen und fraktografischen Untersuchungen konnten die Belastungsetappen eindeutig zugeordnet werden [18].

Tabelle 5 : 1.Versuchsreihe, Geradrohr mit Umfangsfehler, CEGB-Hangerkonfiguration [18]

	Versuchsblock	Belastungsart	Bemerkungen
Vorversuche	E 32.00.1	100 % SSE	System kalt, ohne Innendruck, 1 Versuch System: T = 240°C, p _i = 7 MPa, 1 Versuch
	E 32.00.2	100 % SSE	
1. "Erdbeben"- Belastungsetappe	E 32.11.1, E 32.11.10	100 % SSE	System: T = 240°C, p _i = 7 MPa, 10 Versuche
	E 32.12.1, E 32.12.10	400 % SSE	System: T = 240°C, p _i = 7 MPa, 10 Versuche
	E 32.13.1, E 32.13.10	600 % SSE	System: T = 240°C, p _i = 7 MPa, 10 Versuche
	E 32.00.3	SINEBURST 15 mm Auslenkung	System: p _i = 7 MPa, T = 240°C, 1 Versuch
Zwischenetappe zur Erzeugung einer neuen Ausgangsrisstiefe	E 32.14.1	SINEBURST	System: T = 240°C, p _i = 7 MPa, 10 Versuche
	E 32.14.1	30 mm Auslenkung	
	E 32.15.1	SINEBURST	System: T = 240°C, p _i = 7 MPa, 10 Versuche
	E 32.15.10	30 mm Auslenkung	
Zwischenetappe zur Erzeugung einer neuen Ausgangsrisstiefe	E 32.16.1	SINEBURST	System: T = 240°C, p _i = 7 MPa, 10 Versuche
	E 32.16.10	15 mm Auslenkung	
	E 32.17.1	SINEBURST	System: T = 240°C, p _i = 7 MPa, 10 Versuche
	E 32.17.10	36 mm Auslenkung	
	E 32.18.1	SINEBURST	System: T = 240°C, p _i = 7 MPa, 10 Versuche
	E 32.18.10	40 mm Auslenkung	
			(ab 4. Sineburst-Block Hanger H8 defekt) Abfahren zur Reparatur von Hanger H8
2. "Erdbeben"- Belastungsetappe	E 32.19.1 - E 32.19.10	100 % SSE	System: T = 240°C, p _i = 7 MPa, 10 Versuche
	E 32.20.3 - E 32.20.10	400 % SSE	System: T = 240°C, p _i = 7 MPa, 10 Versuche
	E 32.21.1 - E 32.21.8	600 % SSE	System: T = 240°C, p _i = 7 MPa, 8 Versuche Leck bei Vers.-Nr.: E 32.21.8

Tabelle 6 : 2.Versuchsreihe, Rohrbogen mit Längsfehlern, KWU-Hängerkonfiguration [18]

	Versuchsblock	Belastungsart	Bemerkungen
Vorversuch	E 32.30.1	100 % SSE	System kalt, ohne Innendruck, 1 Versuch
	E 32.30.2	Zur Bestimmung der 1. Eigenfrequenz	System: T = 240°C, p _i = 7 MPa Leckage an Überdrucksicherung bei D°14
1. "Erdbeben" Belastungsetap pe	E 32.31.1 - E 32.31.10	100 % SSE	System: T = 240°C, p _i = 7 MPa, 10 Versuche
	E 32.32.1 - E 32.32.10	400 % SSE	System: T = 240°C, p _i = 7 MPa, 10 Versuche
	E 32.33.1 - E 32.33.10	800 % SSE	System: T = 240°C, p _i = 7 MPa, 10 Versuche
1. Zwischen- etappe zur Erzeugung einer neuen Ausgangsrißtie fe	E 32.34.1 E 32.34.2	SINEBURST	System: T = 240°C, p _i = 7 MPa, 10 Versuche - Ankerplatte von Hänger H 14 aus der Wand gerissen
	E 32.34.5 E 32.34.6		- DF 16 - Entlüftungsleitungen verbogen - H 9 - Gelenkstrebe verbogen - Isolierung teilweise lose bzw. weg - Kontermutter von Federhänger H 13 lose
	E 32.34.10		
	E 32.35.1	SINEBURST	System: T = 240°C, p _i = 7 MPa, 5 Versuche - Leckage an austenitischer Rohrleitung DN 100 Schweißnaht Bogen/Geradrohr
	E 32.35.5		
	E 32.36.1	SINEBURST	System: T = 240°C, p _i = 7 MPa, 10 Versuche - Abriß von Kühlwasserleitung für BA-Aufnehmer - Bolzen an Gelenkstrebe H 9 abgerissen - Hänger H 19 abgerissen - "Festpunkt" DF 15 lose, 2 Dübel abgerissen, Rohrschelle an Seitenstütze lose, 2 Flanschbolzen lose
	E 32.36.10		
	E 32.37.1 E 32.37.2 E 32.37.5	SINEBURST	System: T = 240°C, p _i = 7 MPa, 5 Versuche - Leckage an Entlüftung über D 14 - "Festpunkt" DF 15 wieder lose
	E 32.38.1 E 32.38.10	SINEBURST	System: T = 240°C, p _i = 7 MPa, 10 Versuche
1. Zwischen- etappe zur Erzeugung einer neuen Ausgangsrißtie fe	E 32.39.1	SINEBURST	System: T = 240°C, p _i = 7 , 9 Versuche Leckage an austenitischer Rohrleitung DN 125 am Übergang zu einem Reduzierstück DN 200 Entlüftungsleitung von DF 16 abgerissen Entlüftungsleitung von DR 205 abgerissen Rohrschellen von Gelenkstrebe H 23 deformiert Isolierung größtenteils beschädigt u. abgefallen
	E 32.39.9		
	E 32.40.1	SINEBURST	System: T = 240°C, p _i = 7 MPa, 10 Versuche Gehäuseüberdrucksicherungen am DF 15 abgerissen, Federhänger H 15 aus Halterung gerissen
	E 32.40.10		
	E 32.41.1	SINEBURST	System: T = 240°C, p _i = 7 MPa, 1 Versuch Bolzen an den Gelenkstreben H 23 abgerissen
	E 32.42.1 E 32.42.2	SINEBURST	System: T = 240°C, p _i = 7 MPa, 10 Versuche Leckage an austenitischem Rohrbogen DN 100 Anrisse an 2. austenitischen Halbschalen-bogen festgestellt
	E 32.42.10		
2. "Erdbeben" Belastungsetap pe	E 32.43.1 E 32.43.2	100 % SSE	System: T = 240°C, p _i = 7 MPa 2 Versuche
	E 32.44.1 E 32.44.2	400 % SSE	System: T = 240°C, p _i = 7 MPa 2 Versuche
	E 32.45.1	800 % SSE	System: T = 240°C, p _i = 7 MPa, 1 Versuch
	E 32.46.1	SINEBURST	System: T = 240°C, p _i = 7 MPa, 1 Versuch Leckage an Mischnaht, DR 108/ DF 16

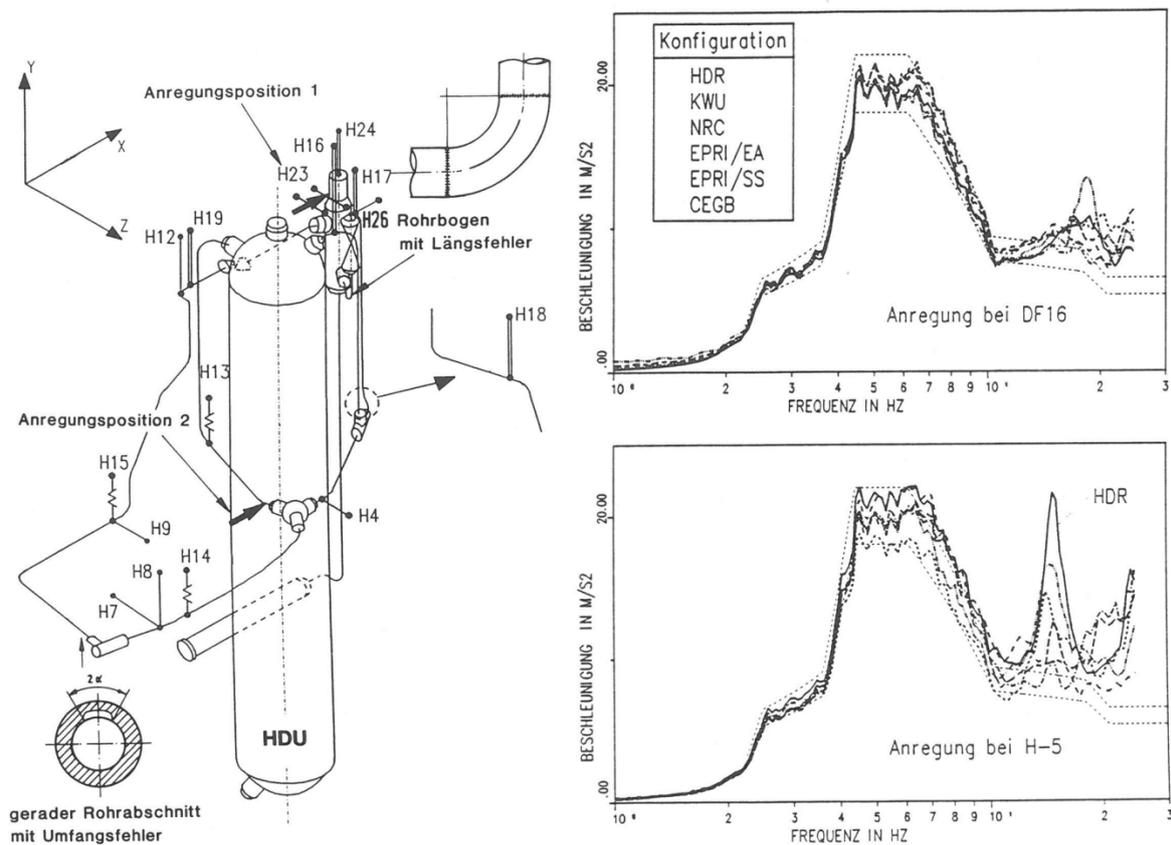


Bild 5: Versuchskreislauf (VKL) des PHDR, Projekt E32 (ERI) und Erregerspektren an der Anregungsposition 1 (DF16) und Anregungsposition 2 (H5) [18]

Die zweite Versuchsserie hatte analog zur ersten zum Ziel, einen in Form von Längsfehlern vorgeschädigten Rohrbogen durch „Erdbeben“-Belastung bis zum Versagen zu bringen.

Nachdem die zweite „Erdbeben“ – Etappe des Rohrkrümmers ohne Versagen und auch ohne von außen messbares Risswachstum beendet war, kam es beim ersten folgenden Sineburst-Block zu einer Leckage an einer Mischnaht Nennweite DN200. Selbst bei achtfacher SSE-Anregung lagen die resultierenden Spannungen unterhalb der für integrale Bauteile zulässigen Grenzen. Als Fazit ließ sich feststellen, dass Fehlergrößen, wie sie zu Beginn jeder „Erdbeben“ – Belastungsetappe vorlagen, bei Belastungen von ca. 3/4 der Zulässigkeitsgrenze nach KTA 3201.2 [1] für Störfälle der Stufe D für integrale Bauteile auch bei wiederholtem Auftreten zu keinem Versagen führten.

Zur Bewertung des Leck-vor-Bruch-Verhaltens des Geradrohrabschnitts wurde eine Traglastbetrachtung nach dem plastischen Grenzlastkonzept durchgeführt. Hiernach wäre bei der zweiten „Erdbeben“ – Belastungsetappe mit einem Versagen in Form von Bruch zu rechnen gewesen. Im Experiment wurde Versagen in Form von Ermüdung und Leckage festgestellt.

7.2 Projekt KARISMA

Im Projekt KARISMA (Kashiwazaki-Kariwa Research Initiative for Seismic Margin Assessment) der IAEA, zu dem der Abschlussbericht noch aussteht, werden die Tragreserven eines sehr tief gegründeten Kraftwerksgebäudes und deren Komponenten untersucht. In [19] wird das Projekt KARISMA erläutert und wird hier wie folgt auszugsweise zitiert: „Das Kernkraftwerk Kashiwazaki-Kariwa in Japan wurde am 16. Juli 2007 von einem Erdbeben, dem sog. Niigata-ken-chuetso-oki earthquake (NCOE) der Magnitude 6.6 erschüttert. Wegen der geringen Distanz von 16 km zum Epizentrum und dank der guten seismischen Anlageninstrumentierung steht vom Hauptstoß und von den zahlreichen Nachstößen des Erdbebens eine umfangreiche Datenbasis zur Verfügung. Am Standort wurden in Bohrlöchern und in den Bauwerken Aufzeichnungen registriert. Im Rahmen ihres Extra Budgetary Project on Seismic Safety of Existing Nuclear Power Plants koordinierte die IAEA die Projekt KARISMA. Mit diesem Projekt wird das Verhalten des im Baugrund tief eingebetteten Reaktorgebäudes von Block 7 und ausgewählter Einrichtungen analysiert. Dabei werden die Ergebnisse von in der Praxis üblichen Modellrechnungen mit den gemessenen Daten verglichen. Ferner erfolgen nichtlineare Tragfähigkeitsberechnungen mit bis zur sechsfachen Last des NCOE in 155 m Tiefe zur Ermittlung der Auslegungsreserven des Reaktorgebäudes. Durch das Projekt sollen wertvolle Erkenntnisse über die vorhandene Erdbebensicherheit bestehender Kernkraftwerke gewonnen werden.

Über die Durchführung von Benchmarks im Rahmen des KARISMA Projekts wird in [20] berichtet. Hierbei wird das Systemverhalten des Nachwärmeabfuhrsystems (residual heat removal piping system) mit einbezogen. Die Berechnungen zeigten auf, dass die Anwendung nationaler Regelwerke zu große Unterschieden im Spannungsnachweis führen kann, insbesondere zwischen dem russischen PNAE- und dem amerikanischen ASME BPVC NB-3600 Regelwerk [21]. Es werden zwar keine Mehrfacherdbeben behandelt, jedoch betrachtet das Projekt Starkbeben und zeigt Differenzen beim punktuellen Spannungsnachweis zwischen beobachtetem und nach unterschiedlichen Regelwerken vorhergesagtem Tragverhalten auf.

7.3 Projekt SMART2013

Im Rahmen des SMART2013-Projekts werden Erdbeben-Simulationen mithilfe von Rütteltischversuchen der CEA durchgeführt. Die Versuche erfolgen mit einem Viertel-Modell eines Kraftwerksgebäudes [22]. Ein Modell einer Rohrleitung wurde ebenfalls implementiert. Während zur Gebäudeantwort bereits Berichte vorliegen, wird eine Publikation zur Systemantwort der Rohrleitung in Kürze erwartet.

8 Bewertung

Bei modalanalytischen linearen Erdbebensicherheitsnachweisen nach der Antwortspektrenmethode führt die entkoppelte Betrachtungsweise von Gebäude und Komponente (vgl. Kapitel 3) in der Regel zu Konservativitäten. Diese Konservativitäten führen offensichtlich dazu, dass Schäden an Rohrleitungen nach Starkbeben kaum bekannt. In [10] wird berichtet, dass Schäden nur in geringer Häufigkeit aufgetreten sind.

Zu den denkbaren Schadensmechanismen gibt es Hinweise aus Forschungsvorhaben, dass andere Mechanismen als erwartet auftreten. Versagen trat meist erst nach extremer Laststeigerung und weitaus höherer Zyklenzahl als bei Starkbeben auf.

So wurde nach dem Plastischen Grenzlastkonzept für einen Riss behafteten Rohrleitungsabschnitt Versagen durch Bruch vorhergesagt, aufgetreten war jedoch Ermüdung und Leckage (HDR-Projekt, [16], [17], und [18]).

Weitere experimentelle Forschungsarbeiten zeigen ebenfalls auf, dass ein wahrscheinlicher Versagensmechanismus Ermüdung und Ratcheting ist [13]. Hierzu wurde ein Benchmarking gestartet, die Ergebnisse können auf der Internetseite des MECOS Projekts verfolgt werden.

Eine Beschreibung, ob und ggf. wie die Rohrleitung in dem SMART2013-Modellversuch versagte wird in Kürze erwartet.

Rohrleitungen erfahren insbesondere nur dann große Erdbebenanregung, wenn Resonanz eintritt und ihre niedrigsten Eigenfrequenzen im hohen Plateau eines Etagenantwortspektrums liegen, Bild 6. Wenn Halterungssteifigkeiten oder Randbedingungen nicht bekannt sind, kann man Näherungswerte in [23] finden, die in Abhängigkeit von der Nennweite angegeben werden und grobe Näherungen darstellen. Diese Näherungswerte werden häufig in Auslegungsrechnungen angesetzt, wie in [24] gezeigt wird. Lassen sich die unteren Eigenfrequenzen eines Rohrleitungssystems nicht sehr präzise ermitteln und liegen sie im ansteigenden bzw. abfallenden Ast zum Plateau, rote Markierung in Bild 6, kann die Rechnung den Lastfall Erdbeben sowohl konservativ überschätzen als auch nicht-konservativ unterschätzen. Beispiele dafür, dass die vorliegenden Eigenfrequenzen der Auslegungsrechnung von den experimentell ermittelten abweichen können, sind u.a. in [25], [26] und [27] beschrieben.

Auch lokale Wanddickenreduzierung, z. B. infolge Erosions-Korrosion, könnte zum Versagen einer Rohrleitung im Lastfall Erdbeben führen. Ein Versuch unter realistischen Randbedingungen zeigte allerdings Ratcheting und schließlich Leck-vor-Bruch Verhalten erst nach einer sehr hohen Zyklenzahl von Biegewechselbeanspruchungen selbst bei großflächigem und weit fortgeschrittenem Wanddickenabtrag [24].

Welche Wechselwirkungen zwischen Rohrleitungen und mit Dübeln befestigte Halterungen beim Lastfall Erdbeben vorliegen können, wird derzeit untersucht, [7] und [8].

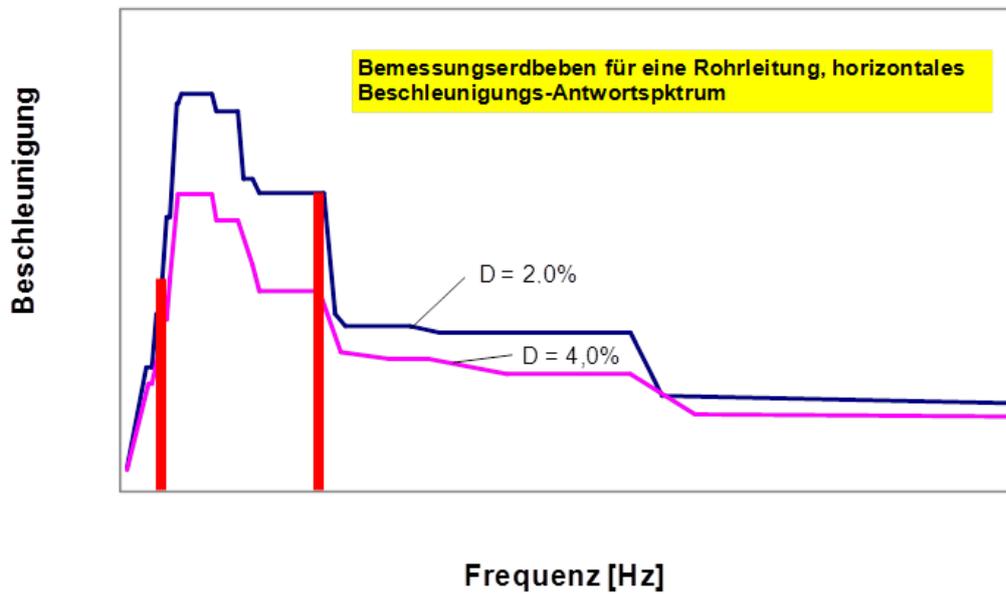


Bild 6: Typisches Etagenantwortspektrum eines Reaktorgebäudes für 2% und 4% Dämpfung mit rot markierten Komponenteneigenfrequenzen

9 Literatur und Unterlagen

- [1] Sicherheitstechnische Regel des KTA (kerntechnischer Ausschuss). KTA 3201.2, Komponenten des Primarkreislaufes von Leichtwasserreaktoren, Teil 2: Auslegung, Konstruktion und Berechnung, Fassung 2013-11, Carl Heymanns Verlag AG, Köln
- [2] Sicherheitstechnische Regel des KTA (kerntechnischer Ausschuss). KTA 3211.2, Druck- und aktivitätsführende Komponenten von Systemen außerhalb des Primarkreises, Teil 2: Auslegung, Konstruktion und Berechnung, Fassung 2013-11, Carl Heymanns Verlag AG, Köln
- [3] Sicherheitstechnische Regel des KTA (kerntechnischer Ausschuss). KTA 1403, Alterungsmanagement in Kernkraftwerken, Fassung 2010-11, Carl Heymanns Verlag AG, Köln
- [4] Sicherheitstechnische Regel des KTA (kerntechnischer Ausschuss). KTA 2201.1, Auslegung von Kernkraftwerken gegen seismische Einwirkungen, Teil 1: Grundsätze, Fassung 2011-11, Carl Heymanns Verlag AG, Köln
- [5] Weiterleitungsnachricht zu Ereignissen in ausländischen Kernkraftwerken, WLN 2012/02, Auswirkungen des Tohoku-Erdbebens an den japanischen Kernkraftwerksstandorten Fukushima Dai-ichi (I) und Dai-ni (II) am 11.03.2011 und des Niigataken Chuetsu-Oki-Erdbebens am japanischen Kernkraftstandort Kashiwazaki-Kariwa am 16.07.2007
- [6] Sicherheitstechnische Regel des KTA (kerntechnischer Ausschuss). KTA 2201.4, Auslegung von Kernkraftwerken gegen seismische Einwirkungen, Teil 4: Anlagenteile, Fassung 2012-11, Carl Heymanns Verlag AG, Köln
- [7] Wechselwirkungen des gekoppelten Systems „Bauwerk – Befestigung (Dübel-Konstruktion) – Rohrleitung“ bei Erdbebenbeanspruchung (Phase I), Reaktorsicherheitsforschung – Project-Nr. 1501450, Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart (MPA Stuttgart), 2015
- [8] Wechselwirkungen des gekoppelten Systems „Bauwerk – Befestigung (Dübel-Konstruktion) – Rohrleitung“ bei Erdbebenbeanspruchung (Phase II), Reaktorsicherheitsforschung – Project-Nr. 1501478, Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart (MPA Stuttgart), 2015, in Bearbeitung
- [9] Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen (HSK): Richtlinie für schweizerische Kernanlagen - Seismische Anlageninstrumentierung, HSK-R-16/d, Februar 1980, Neudruck Januar 1993
- [10] Morita, R. et. al., Statistical analysis for seismic effects of low seismic class equipment based on damage data of nuclear power plants, Proceedings of the ASME 2014 Pressure Vessels & Piping Conference, Paper-Nr. PVP2014-24644, Anaheim, USA, Juli 2014
- [11] Tohoku Electric Power Co., Post-earthquake Activities at Onagawa Nuclear Power Plant, presentation Tohoku Electric Power Co., Inc., November 2010
- [12] International Atomic Energy Agency (IAEA): IAEA mission to Onagawa nuclear power station to examine the performance of systems, structures and components following the great east Japanese earthquake and tsunami, IAEA mission report, department of nuclear safety and security, department of nuclear energy, Onagawa and Tokyo, Japan, 30 July - 11 August 2012
- [13] MECOS Project, Interim Report, OECD/CSNI/WGIAGE seismic survey report, October 2014
- [14] Seismic input definition for nuclear facilities current practices, Report to OECD Nuclear Energy Agency, WGIAGE seismic sub-group, 14 October 2014

- [15] USNRC: SECY-93-087 Policy, technical and licensing issues pertaining to evolutionary and advanced light-water reactor (ALWR) designs. Washington, Juli 1993
- [16] Diem, H. et al., Load bearing capacity of an intact and a degraded pipe system under repeated simulated earthquake loading, Nuclear Engineering and Design, Vol. 130, 1991
- [17] Kussmaul, K. et al., Simulation of Earthquake induced Vibrations subjected to a Piping System. Transactions of the 12th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT), MPA, University of Stuttgart, August 1993
- [18] Kerkhof, K., Verhalten geschädigter Rohrleitungen bei erdbebenähnlicher Belastung und Betriebsbedingungen. Auswertebereich Versuchsgruppe E32, Technischer Fachbericht Nr. 129-94, Kernforschungszentrum Karlsruhe, März 1994
- [19] Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat ENSI: Erfahrungs- und Forschungsbericht 2012, Entwicklungen im Bereich der Grundlagen der nuklearen Aufsicht, 2012
- [20] International Atomic Energy Agency (IAEA): Review of Seismic Evaluation Methodologies for Nuclear Power Plants Based on a Benchmark Exercise, IAEA-TECDOC-1722, Vienna, 2013, ISBN 978-92-0-114913-8, ISSN 1011-4289
- [21] Berkovsky, A., Kireev, O., KARISMA benchmark study of the safety-related nuclear piping system, International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT), San Francisco, USA, 2013
- [22] Zinn, R. et al., SMART2013, ENSI Team 2: Challenges faced during the modelling, dynamic analysis, and vulnerability study with SOFiSTiK using nonlinear layered shell elements, Paris, France, 25. – 27. November 2014
- [23] Verein Deutscher Ingenieure (VDI): VDI Richtlinie 3842 - Schwingungen in Rohrleitungssystemen, Düsseldorf, Juni 2004
- [24] Kerkhof, K. et al., Influence of local wall thinning and support stiffness in piping systems on safety assessments for dynamic loading, Proceedings of the ASME 2014 Pressure Vessels & Piping Conference, PVP2014, Anaheim, USA, Juli 2014
- [25] Prüfung von Unterlagen zur Erdbebensicherheit des Rohrleitungssystems KKP1 TE16, Materialprüfungsanstalt (MPA) Universität Stuttgart, Prüfungsbericht vom 15.02.2011
- [26] Integritätsnachweis sicherheitsrelevanter Rohrleitungssysteme mit Hilfe der Schwingungsanalyse, Phase II: Systemuntersuchungen zur indirekten Bestimmung von Halterungssteifigkeiten, Abschlussbericht Reaktorsicherheitsforschung, Vorhaben-Nr. 1501062, Materialprüfungsanstalt (MPA) Universität, November 2001.
- [27] Birtel, V. et al., Interactions Piping-Anchor-Building – Influence of Changing Support Stiffness on Piping Dynamics, 40th MPA Seminar, Materialprüfungsanstalt (MPA) Universität Stuttgart, 6.-7. Oktober 2014

